环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第8期
2023年8月15日

目 次

2013~2020年天津市 $PM_{2.5}$-O_3 污染变化趋势和影响因素分析 …… 肖致美, 李亚菲, 高璟赟, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戢运峰 (4211)
2015~2020年济南市 O_3 污染趋势及敏感性变化分析 …… 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区 O_3 污染特征、生成敏感性及传输影响分析 …… 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市"十三五"期间 O_3 污染特征和驱动因子 …… 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赟, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 对减排的响应 …… 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 …… 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑娉, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块 VOCs 源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 …… 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 …… 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 …… 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 …… 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 …… 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 …… 白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 …… 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 …… 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 …… 朱弈, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 …… 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 …… 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤 PAHs 的含量、分布、源解析与风险评价 …… 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 …… 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 …… 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 …… 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 …… 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 …… 丁丹, 黄晓侬, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新宪, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对 Cd、Pb、Zn 累积途径探究 …… 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 …… 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加 Fe_3O_4/桑树杆生物炭对土壤砷形态和水稻砷含量的影响 …… 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥复施对镉污染水稻土修复效应及机制 …… 张丽, 李如霞, 何玉垒, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 …… 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中 Pb 钝化的影响 …… 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 …… 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 …… 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 …… 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 …… 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 …… 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 …… 谢军, 王子芳, 王鉴燕, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 …… 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土理化性质和细菌群落的影响 …… 刘月, 杨树青, 张万锋, 娄帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 …… 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 …… 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策 …… 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 …… 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邬娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 …… 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 …… 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 …… 古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 …… 李艾雯, 宋靓颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 …… 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 …… 秦纪法, 张佳彭, 桑娈, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 …… 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 …… 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 …… 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 …… 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 …… 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化处理技术分析 …… 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

2017～2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析

郭朝臣, 雷坤*, 李晓光, 周波, 吕旭波
(中国环境科学研究院水生态环境研究所, 北京 100012)

摘要: 基于2017～2020年长江流域重要水系节点各污染物监测数据,在时空尺度下开展对长江流域干、支流水系通量变化规律的研究,从断面水量和水质及通量等方面分析其空间变化响应、年际变化趋势和通量相关性关系分析,揭示长江流域上游、中游和下游污染物通量时空贡献特征. 结果表明,4年来长江流域主要污染物浓度整体呈下降趋势,总磷(TN)和氨氮(NH_4^+-N)浓度下降较为明显,干流总氮(TN)和总磷(TP)浓度均在空间分布上呈现自西向东逐渐增高趋势,上中下游高锰酸盐指数在2017～2020年分别下降18.5%、16.0%和14.0%,以上游下降幅度最高. 径流量空间分布年均值从466亿 m^3 显著增大到9 923亿 m^3,支流河湖水系中两湖流域水量贡献最大,主要污染物中高锰酸盐指数、总磷(TP)和总氮(TN)通量年均呈现先增后减的趋势,岷沱江、嘉陵江和中游两湖地区污染物通量对入江贡献较大,不同区域水环境下通量存在差异性. 相关性和层次聚类分析结果表明,高锰酸盐指数和总磷(TP)通量与水量呈极显著性相关,通量关系间生化需氧量(BOD_5)与总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)有显著相关性,主要污染物在汛期和非汛期差异性较强,在7～9月汛期反应强烈. 研究结果可为长江流域水环境统筹管理与精准化防治等方面提供科学依据与理论支持.

关键词:长江流域; 污染物浓度; 通量;时空变化; 相关性
中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)08-4279-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202209245

Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020

GUO Chao-chen, LEI Kun*, LI Xiao-guang, ZHOU Bo, LÜ Xu-bo
(Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the monitoring data of various pollutants at important water system points in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020, research on the flux change law of the main and tributary water systems in the Yangtze River Basin was carried out at the spatiotemporal scale, and the spatial change response, interannual change trend, and flux correlation analysis were analyzed from the aspects of water quantity, quality, and flux so as to reveal the spatial-temporal contribution characteristics of pollutant flux in the upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River Basin. The results showed that over the past four years, the concentration of major pollutants in the Yangtze River Basin showed an overall downward trend. The concentration of total phosphorus (TP) and ammonia (NH_4^+-N) decreased significantly. The concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the main stream gradually increased from west to east. The annual concentration of permanganate index in the upper, middle, and lower reaches decreased by 18.5%, 16.0%, and 14.0%, respectively, from 2017 to 2020, with the highest decline in the upper reaches. The four-year average value of the spatial distribution of runoff significantly increased from 466×10^8 m^3 to $9\,923\times10^8$ m^3. The two lake basins in the tributary river lake water system had the largest contribution to the water volume. The fluxes of permanganate index, total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN) among the main pollutants showed an annual increase and then decrease trend. The pollutant fluxes in the Minjiang River, Tuojiang River, Jialing River, and the middle reaches of the two lakes contributed greatly to the river inflow. There were differences in fluxes in different regional water environments. The results of correlation and hierarchical cluster analysis showed that the permanganate index and TP fluxes were highly significantly correlated with water volume, and there was a significant correlation between biochemical oxygen demand (BOD_5) and total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD). The main pollutants showed strong differences in the flood and non-flood periods and had a significant response in the flood season from July to September. The research results can provide scientific basis and theoretical support for the integrated management and precise prevention and control of the aquatic environment in the Yangtze River Basin.

Key words: Yangtze River Basin; concentration of pollutants; flux; spatiotemporal variation; correlation

长江流域是指长江干流和支流流经的广大区域,干流全长6 300多km,自西向东流经青、蜀、藏、云、渝、鄂、湘、赣、皖、苏、沪等11个省(自治区、直辖市)注入东海. 支流展延至贵、甘、陕、豫、浙、桂、粤、闽等8个省(自治区),横跨中国西部、中部和东部三大经济区,是世界第三大流域,流域总面积180万 km^2,占我国国土面积的18.8%,人口和生产总值均超过全国的40%,对推动我国流域水资源保护与发展研究有重要意义[1,2].

近年来,在长江流域经济高速发展与不断创造价值过程的同时,各类环境问题也不可避免地发生,区域生态付出了沉重的代价[3～5]. 开展长江流域水质、水量及污染物浓度时空分布特征分析和评估,对于科学评判长江流域水质时空分布特征及变化规律,提升长江流域水质,保护长江流域生态特征具有重要意义. 此前,很多学者在不同尺度上对长江流域

收稿日期: 2022-09-26; **修订日期**: 2022-10-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101705)
作者简介: 郭朝臣(2000～),男,硕士研究生,主要研究方向为流域水环境管理,E-mail: guochaochen21@mails.ucas.ac.cn
* 通信作者,E-mail:leikun@craes.org.cn

水质进行了大量研究,Dong 等[6]对长江中下游沿岸城市磷的分布特征及空间差异进行了分析;王艳分等[7]探究了长江流域重要通江湖泊洞庭湖水系水质污染关键驱动因素;Li 等[8]在长时间尺度下对三峡库区污染物情况进行评估;王文静等[9]对汉江水系点源和面源主要污染物通量时空分布进行研究;刘发根等[10]对鄱阳湖水系水质年际通量及其影响因素进行了分析.此外,有学者从长江水系水质评价方法[11]、水质预测模型[12,13]、水环境影响评价[14,15]和污染物溯源[16,17]等方面开展了长江水系的定性与定量评估.综上,现有的研究大多局限于通过长江流域部分河段和湖泊等进行局部分析探讨,或仅仅对干流整体进行现状定性评价与通过评估方法上的创新开展实验,鲜有对长江全流域时空尺度下污染物通量时空特征进行探讨.

因此,本研究基于 2017 ~ 2020 年长江流域重要水系节点各污染物监测记录数据,从断面水量、水质和通量等方面展开分析,对其时空变化特征、年际变化趋势、污染物通量与流量和浓度相关性进行研究;并结合主要污染物通量成分贡献与上游、中游和下游通量汇入对全过程影响及汛期和非汛期水量季节性聚类分析等,以期为科学认识长江流域水环境治理成效、开展长江流域水环境统筹管理和制定水环境保护措施等提供科学依据与借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究范围

研究区域为长江流域江河湖泊水系,研究时段为 2017 ~ 2020 年.综合考虑水文特征,污染物通量变化特征分析选取长江干流 6 个典型监测控制断面,包括上游的石鼓和向家坝断面、中游三峡大坝前后的寸滩和宜昌断面以及下游湖泊网密集分布的汉口和大通断面,以及包括嘉陵江、岷沱江、乌江、洞庭湖和鄱阳湖等长江主要支流水系在内的 13 个重要节点监测断面(见图 1).

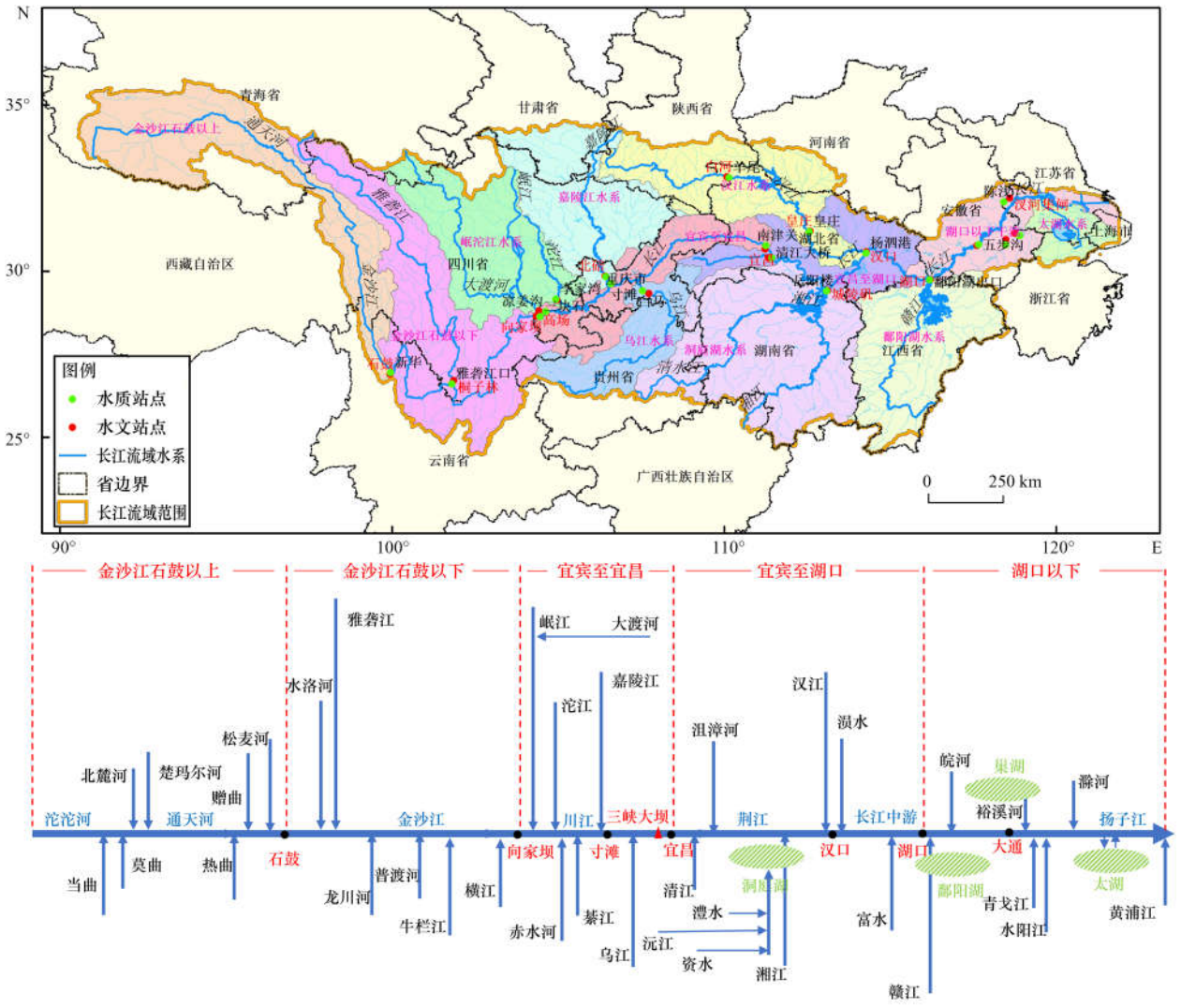


图 1 长江流域干支流水系监测断面和分布概况

Fig. 1 Monitoring section locations and overview of mainstream and tributaries in the Yangtze River Basin

1.2　数据来源

根据 2017～2020 年长江流域主要污染情况，重点选取水质参数指标包括高锰酸盐指数、生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)和总磷(TP)等进行浓度和通量变化趋势分析. 其中，计算通量所需的径流量数据来源于水利部长江水利委员会编纂的《长江流域重要控制断面水资源监测通报》和《长江水文年鉴》，各水质参数指标的浓度数据来源于生态环境部长江流域水系水质断面监测数据库，选取与水文监测站点地理距离最近的水质监测站点.

1.3　通量计算方法

目前国内外学者已对河流污染物通量计算方法及其产生的各类误差修正进行了系统总结[18～22]，采用公式(1)和公式(2)进行河流断面月通量(F_{mi})和年通量(F_{ai})的计算：

$$F_{mi} = c_i \times l_i \tag{1}$$

$$F_{ai} = \sum_{i=1}^{12} (c_i \times l_i) \tag{2}$$

式中，F_{mi}为河流断面月度通量(10^3 t)，F_{ai}为年度通量(10^3 t)，c_i为河流断面某污染因子某年 i 月浓度值(mg·L^{-1})，l_i为该河流断面某年 i 月径流量(10^8 m^3).

1.4　数据处理

水文水质监测断面分布情况通过 ArcGIS 10.2 进行空间展示. Minitab 17 用于干支流断面时空尺度上相似性层次聚类，聚类方式和测量方式分布为组间平均链锁与欧氏距离. 污染物通量空间分异性 Circos 和弦图源图由 RStudio(v3.6.3)生成，其他图表由 Graphpad Prism (v8.0.2)和 Origin 2021 绘制.

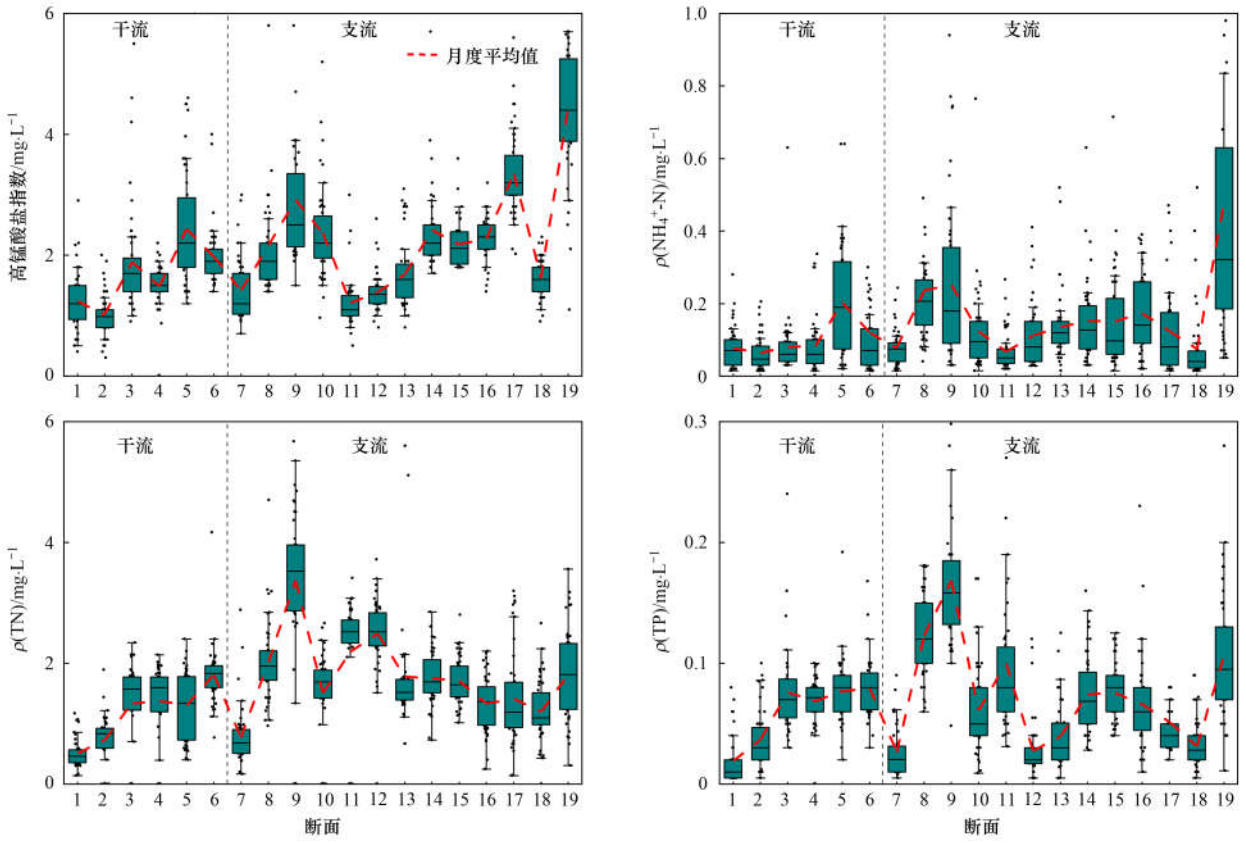
2　结果与分析

2.1　主要污染物浓度时空特征分析

2.1.1　空间分布特征

2017～2020 年长江流域重要控制断面主要污染物连续 48 个月动态监测空间分布如图 2 所示，其中，箱型图上下须线为统计四分位点，红断线为水质站月浓度算术平均值连接线，黑断线左右两侧为干流、支流浓度数据，分别自发源地至入海口排列. 统计学数据如表 1 所示，体现控制断面水质空间分布特征.

由图 2 和表 1 可知，2017～2020 年长江流域干支流高锰酸盐指数月均值低于 GB 3838-2002 标准



1. 新华，2. 三块石，3. 寸滩，4. 南津关，5. 杨泗港，6. 五步沟，7. 雅砻江口(雅砻江)，8. 凉姜沟(岷江)，9. 李家湾(沱江)，10. 北温泉(嘉陵江)，11. 白马(乌江)，12. 清江大桥(清江)，13. 羊尾(汉江)，14. 皇庄(汉江)，15. 岳阳楼(洞庭湖)，16. 鄱阳湖出口(鄱阳湖)，17. 西湖湖心(水阳江)，18. 泾南交界(青戈江)，19. 陈浅(滁河)

图 2　48 个月连续监测长江流域重要控制断面主要污染物月均浓度变化

Fig. 2　Monthly average concentrations of major pollutants at main control sections in the Yangtze River Basin for 48 months

中河流Ⅲ类限制标准(6 mg·L^{-1}),干流上游及源头部分达到Ⅰ类标准(2 mg·L^{-1}),作为通江湖泊的代表,鄱阳湖和洞庭湖等下游监测断面该指数低于流域整体平均值,反映出地区河湖有机物污染防治措施较为有效[23]. 长江流域干支流NH_4^+-N浓度总体平稳且良好,95%以上水质监测浓度数据达到Ⅱ类标准限值(0.5 mg·L^{-1}),长江入海口地区NH_4^+-N浓度依然最高,与该地经济较为发达及点源污染较多有关[20]. 根据4年来长江干流六大主要控制站月度监测数据显示,干流氮、磷浓度均呈现自西向东逐渐增高趋势. 且如果按照GB 3838-2002中较为严格的湖、库地表水环境质量限值标准长江流域部分水系出现高于Ⅴ类区域. 氮、磷自20世纪70年代就被认为是导致富营养化的重要环境因子,长江流域一直以来处于各类生产生活活动交替更迭的状态,是富营养化的重灾区[24~26]. 支流不同水系污染物浓度变化较大,整体保持从源区至嘉陵江水系前上升而后下降的趋势,各污染物在支流嘉陵江水系处有显著降低趋势,可能与位于嘉陵江和乌江之间的三峡大坝较强的拦截作用有关. 从图2和表1中TP和TN浓度变化空间分布来看,长江上游支流沱江水系明显高于其他地区,甚至在盒须图中下四分位点数值基本高于其他所有点位,一定程度上说明其富营养化风险较高.

表1 2017~2020年长江流域主要控制断面月度水质特征/mg·L^{-1}

Table 1 Monthly water quality results of main control sections in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020/mg·L^{-1}

	断面	高锰酸盐指数			$\rho(NH_4^+$-N)			ρ(TP)			ρ(TN)		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
长江干流	新华	1.24	2.90	0.40	0.08	0.28	0.02	0.02	0.08	0.01	0.51	1.17	0.14
	三块石	1.01	2.00	0.30	0.06	0.21	0.02	0.04	0.10	0.01	0.73	1.89	0.00
	寸滩	1.89	5.50	0.90	0.08	0.63	0.03	0.08	0.24	0.03	1.34	2.34	0.00
	南津关	1.49	2.20	0.00	0.08	0.34	0.00	0.07	0.10	0.00	1.37	2.14	0.00
	杨泗港	2.44	4.60	1.20	0.20	0.64	0.02	0.08	0.19	0.02	1.31	2.40	0.40
	五步沟	1.97	4.00	1.40	0.12	1.47	0.02	0.08	0.17	0.03	1.81	4.17	0.77
长江支流	雅砻江口(雅砻江)	1.41	3.00	0.70	0.08	0.24	0.02	0.03	0.09	0.01	0.77	2.88	0.17
	凉姜沟(岷江)	2.16	8.40	1.40	0.24	1.71	0.04	0.12	0.18	0.06	2.02	4.71	0.96
	李家湾(沱江)	2.91	6.80	1.50	0.25	0.94	0.03	0.17	0.32	0.05	3.37	6.63	0.00
	北温泉(嘉陵江)	2.37	5.20	0.96	0.12	0.77	0.02	0.06	0.17	0.01	1.51	2.66	0.00
	白马(乌江)	1.21	3.00	0.50	0.07	0.27	0.02	0.10	0.35	0.03	2.19	3.41	0.00
	清江大桥(清江)	1.39	2.60	0.80	0.11	0.41	0.03	0.03	0.12	0.01	2.49	3.72	0.00
	羊尾(汉江)	1.69	3.10	0.80	0.14	0.52	0.02	0.04	0.13	0.01	1.78	5.60	0.67
	皇庄(汉江)	2.42	5.70	1.70	0.15	0.63	0.03	0.07	0.16	0.03	1.75	2.85	0.73
	岳阳楼(洞庭湖)	2.18	3.60	1.80	0.15	0.72	0.02	0.08	0.13	0.04	1.71	2.80	1.02
	鄱阳湖出口(鄱阳湖)	2.27	3.20	1.40	0.17	0.39	0.02	0.07	0.23	0.01	1.33	2.20	0.25
	西湖湖心(水阳江)	3.35	5.60	2.02	0.12	0.47	0.02	0.05	0.36	0.02	1.41	3.20	0.14
	泾南交界(青戈江)	1.62	2.30	0.90	0.07	0.52	0.02	0.03	0.09	0.01	1.21	2.66	0.00
	陈浅(滁河)	4.48	7.90	1.10	0.48	1.75	0.05	0.11	0.28	0.01	1.81	3.56	0.31

2.1.2 年际变化趋势

长江干流上中下游监测断面高锰酸盐指数、NH_4^+-N、TP和TN年际浓度变化特征如图3所示,2017~2020年长江流域各污染物浓度整体呈波动下降趋势. 与2017年相比,2020年长江干流上中下游高锰酸盐指数分别下降18.5%、16.0%和14.0%,以上游下降幅度最高. 所选取的4类监测指标中$\rho(NH_4^+$-N)变化波动最大,下游断面从2017年的0.241 mg·L^{-1}下降到0.044 mg·L^{-1},减少81.7%,而上游波动最小,整体变化率仅为3.2%,中游次之为11.7%. NH_4^+-N受水体环境变化影响较小,大幅下降的原因可能与下游发达地区以NH_4^+-N为导向的水环境控污政策有关. TP的浓度下降较为明显,2017~2020年4年间长江干流上中下游断面ρ(TP)呈单调下降趋势,上游断面从2017年的0.085 mg·L^{-1}降至2020年的0.062 mg·L^{-1},下降约27.1%;中游和下游分别下降22.7%和34.8%. 长江流域沿岸磷肥企业众多且广泛分布较难以治理,近年来长江流域"分区控制、分类治理",不断精细化水污染管控措施效果显著[27]. 从图3可以看出长江干流不同区间ρ(TN)上下波动较为明显,2018年中游出现最低均值为0.733 mg·L^{-1},而峰值在2020年由下游监测断面检测出为1.912 mg·L^{-1},变化不稳定性目前阶段仍较强.

2.2 径流量和通量时空特征

2.2.1 径流量时空变化

长江流域各水系径流量监测数据来自距离水质监测断面最近的水文站. 图4为长江干流及支流代表水系径流量时空变化特征,从中可以看出2017~2020年自西向东长江干流径流量单调增大,4 a均

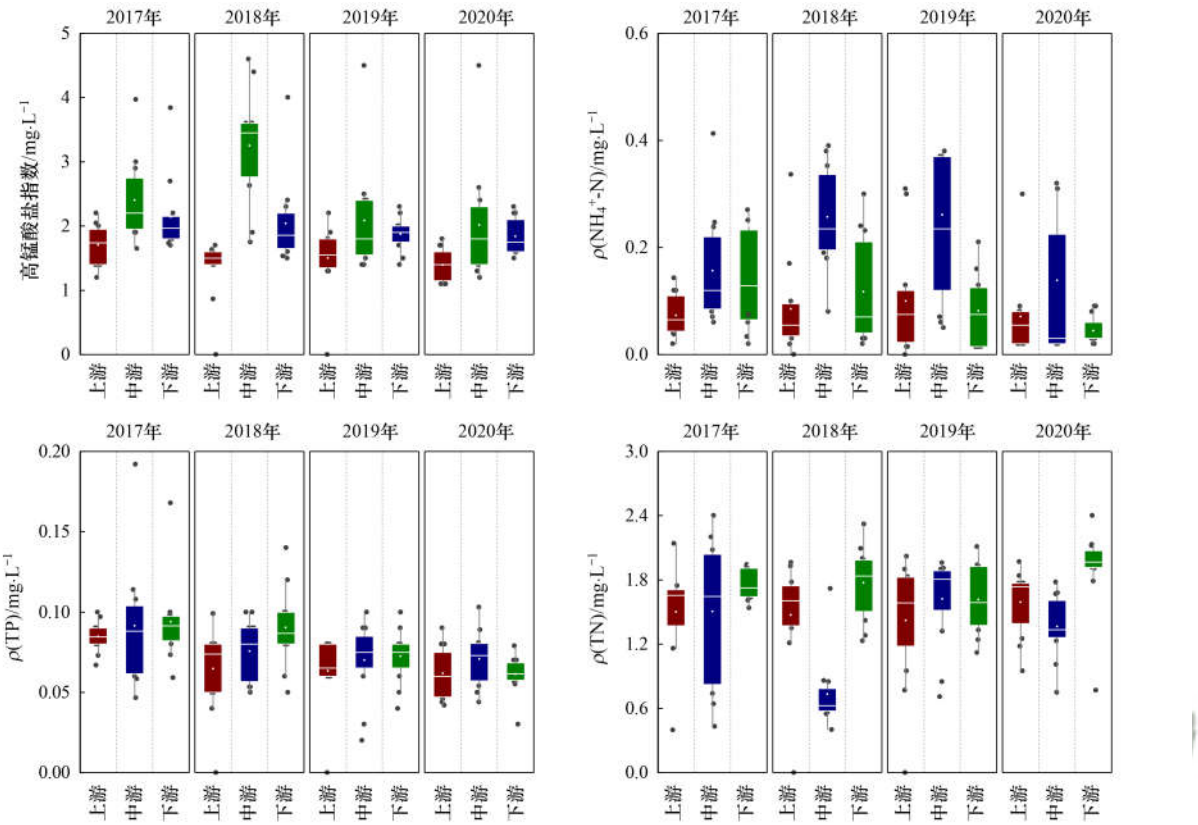
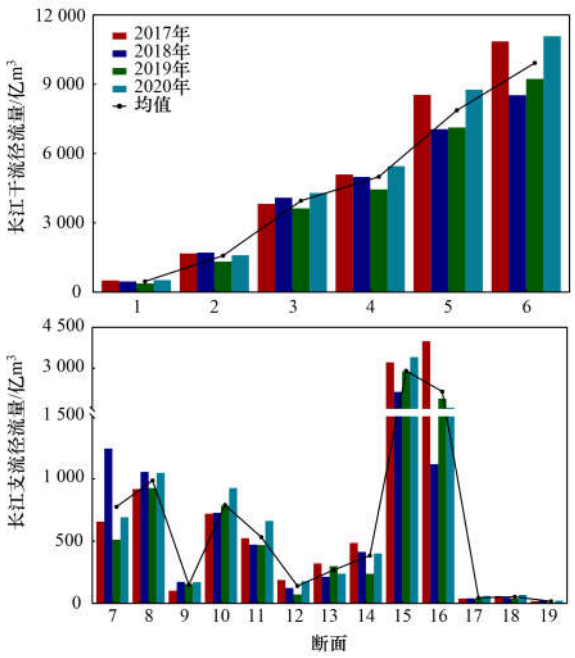


图 3　2017～2020 年长江流域干流高锰酸盐指数、NH_4^+-N、TP 和 TN 浓度比较

Fig. 3　Interannual levels of permanganate index, NH_4^+-N, TP, and TN in the mainstream of the Yangtze River from 2017 to 2020



1. 石鼓，2. 向家坝，3. 寸滩，4. 宜昌，5. 汉口，6. 大通，7. 桐子林(雅砻江)，8. 高场(岷江)，9. 富顺(沱江)，10. 北碚(嘉陵江)，11. 武隆(乌江)，12. 高坝洲(清江)，13. 白河(汉江)，14. 皇庄(汉江)，15. 城陵矶(洞庭湖)，16. 湖口(鄱阳湖)，17. 新河庄(水阳江)，18. 西河镇(青戈江)，19. 汉河集闸下(滁河)

图 4　2017～2020 年长江流域干支流径流量时空变化特征

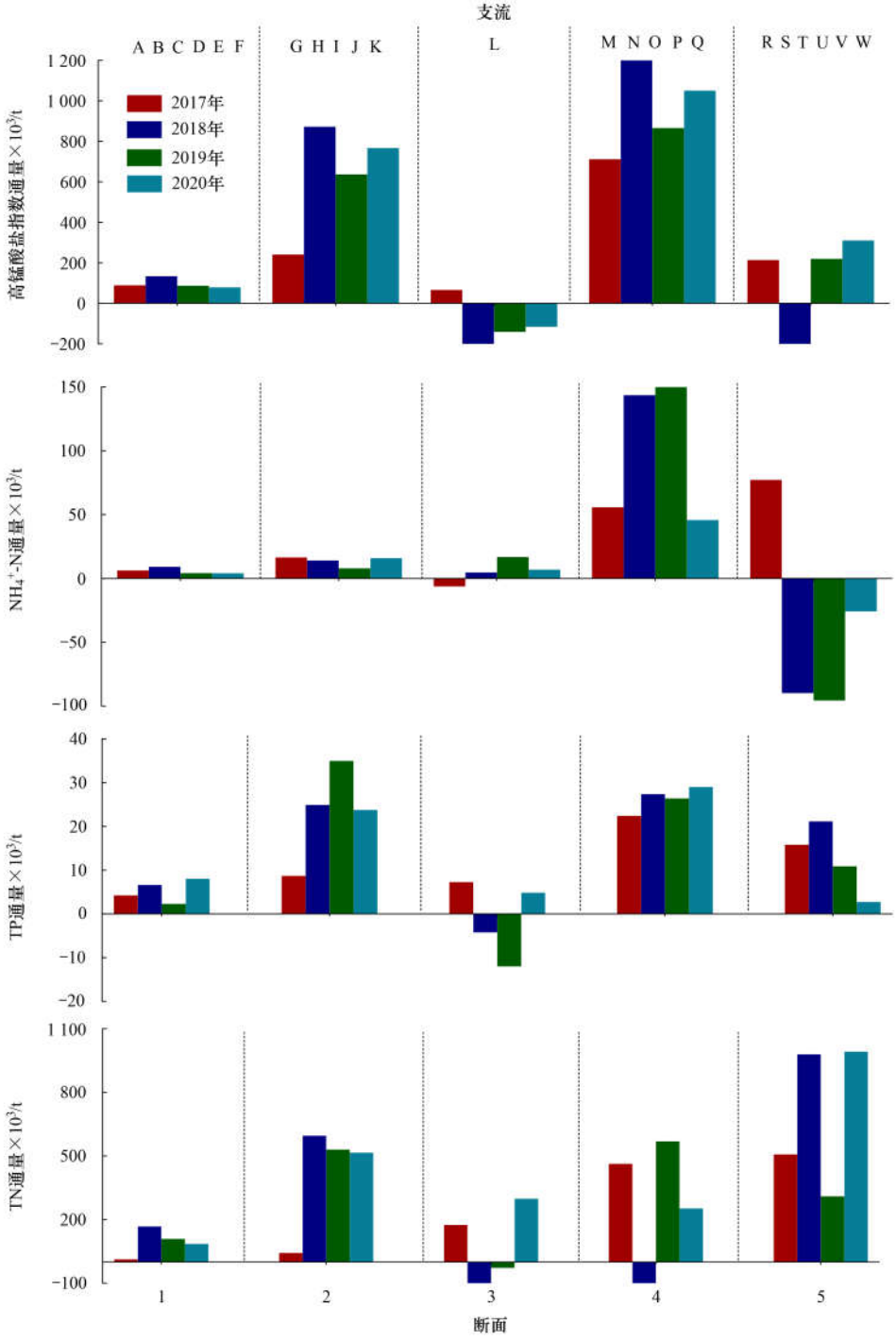
Fig. 4　Spatiotemporal variations in runoff of mainstream and tributaries in the Yangtze River from 2017 to 2020

值由石鼓站的 466 亿 m^3 显著增大到大通站9 923亿 m^3. 各断面径流量丰、枯水年表现并非完全一致，如下游汉口和大通站监测断面在年径流量较大时丰、枯水年性质表现较强，丰水年为 2017 年和 2020 年，径流量保持在均值以上，枯水年则为 2018 和 2019 年. 其他干流断面径流量在 4 年间波动幅度较小，但在 2019 年均达到最低幅度. 此外图 4 也选取支流代表水系径流量变化比较，4 年来两湖(洞庭湖和鄱阳湖)水系径流量较丰富，年际均值均达到2 000亿 m^3 以上，同干流径流量丰、枯水期表现较为一致，洞庭湖水系在 2020 年达到最大值为2 904亿 m^3，鄱阳湖水系最大为 2017 年的2 133亿 m^3. 其他支流水系年际变化较为稳定，均值较低，图 4 中均值最低为富顺水文监测站，即沱江断面年际径流量均值 150 亿 m^3. 洞庭湖水系径流量丰富的原因可能跟自 2003 年三峡工程运行以来，洞庭湖来水大部来自于湖南四水入湖，多年径流量得以保持在较高水平[28].

2.2.2　通量时空变化特征

选取分布在长江流域上、中、下游各监测断面水质站浓度和水文站径流量数据，按照公式(2)计算 2017～2020 年长江流域控制断面主要污染物通量，结果见表 2. 长江干流高锰酸盐指数和NH_4^+-N通量 4 年间最大值均出现在汉口，分别为2 359. 36 ×

10^3 t 和 183.37 × 10^3 t，TP 和 TN 最大值出现在末端大通断面，分别为 77.44 × 10^3 t 和2 162.47 × 10^3 t. 支流最大值均出现在洞庭湖水系. 计算 4 年来长江干流各相邻断面区间通量差，并以区间主要支流标志如图 5 所示. 从中可知，所选取 4 类主要污染物指标在宜昌前后区间相差最大，在寸滩-宜昌段各污染物通量数值首次出现反向爬升，即在图 5 差值中表现为负值；而在相邻的宜昌-汉口段通量相差达到峰值. 近年来相关研究表明[29~32]，诸如南水北调大型跨流域调水工程、丹江口水库及其梯级枢纽工程修建、三峡大坝蓄水活动均会对周边大范围水体造成不同程度的影响，逆转原有天然水文情势如流量、水质等进而改变水体综合特征. 如在此次研究中宜昌处三峡大坝对各污染物拦截作用较为明显，相邻区段



1. 石鼓-向家坝，2. 向家坝-寸滩，3. 寸滩-宜昌，4. 宜昌-汉口，5. 汉口-大通；A. 水洛河，B. 雅砻江，C. 龙川河，D. 普渡河，E. 牛栏江，F. 横江，G. 岷江，H. 沱江，I. 赤水河，J. 綦江，K. 嘉陵江，L. 乌江，M. 清江，N. 沮漳河，O. 洞庭湖，P. 湘江，Q. 汉江，R. 溇水，S. 富水，T. 赣江，U. 鄱阳湖，V. 皖河，W. 巢湖

图 5 2017～2020 年长江流域主要控制断面区间通量差

Fig. 5 Interval flux difference in main control sections in the Yangtze River from 2017 to 2020

通量差值计算结果也较好地佐证了这一点. 干流末端(汉口-大通) NH_4^+-N通量陡减而 TN 突增,可能受长三角地带城市化导致较强的硝化作用累积影响[33]. 近年来相关研究表明,城市化可以通过改变土壤结构性质如其中凋落物的数量和质量进而引起相关微生物活动变化(如硝化细菌、氨化细菌等)来影响氮素转化速率,其结果是使得城市环境中氮的硝化作用显著高于郊区及农村环境[34～36]. 长江干流末端这一现象也佐证了这一结论. 长江支流主要控制断面 2017～2020 年各污染物通量变化特征相似,空间上自西向东先升后降,在洞庭湖与鄱阳湖处各污染物数值达到最高,说明两湖地区污染物入江贡献较大. N/P 值整体在 20～30 之间,且 TN 浓度保持在较高水平,说明水体呈磷限制潜在富营养化趋势明显[25].

表 2　2017～2020 年长江流域主要控制断面年度通量数据 $\times 10^3$/t

Table 2　Annual flux data of main control sections in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020 $\times 10^3$/t

	断面	高锰酸盐指数通量			NH_4^+-N通量			TP 通量			TN 通量		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
长江干流	石鼓	33.28	87.28	16.81	2.92	4.69	1.38	0.85	1.63	0.28	16.50	18.27	11.85
	向家坝	99.37	221.12	105.82	8.83	13.28	5.54	6.15	8.48	3.35	110.26	185.58	24.46
	寸滩	514.21	1 093.44	346.65	22.37	27.35	16.74	29.23	38.32	13.19	531.15	780.85	66.89
	宜昌	467.90	783.96	412.85	27.87	33.49	17.69	28.20	37.08	20.47	612.44	918.02	241.84
	汉口	1 161.26	2 359.36	1 124.93	126.58	183.37	73.42	54.49	66.08	42.89	895.13	1 198.85	505.95
	大通	1 324.90	2 146.04	1 338.80	93.08	150.51	48.31	67.13	77.44	58.68	1 592.05	2 162.47	1 212.25
长江支流	桐子林(雅砻江)	67.53	214.38	79.19	7.06	14.20	3.92	2.58	5.86	1.33	68.79	110.62	32.19
	高场(岷江)	158.26	276.91	91.02	16.69	21.19	12.10	10.29	13.31	5.46	165.80	235.06	88.05
	富顺(沱江)	29.95	64.22	16.92	2.21	3.26	0.81	2.19	2.76	1.06	52.63	82.48	12.20
	北碚(嘉陵江)	119.87	245.84	31.05	7.75	14.61	2.04	5.43	7.25	0.98	119.23	175.25	9.04
	武隆(乌江)	39.55	75.64	27.19	2.46	2.57	2.22	3.93	4.49	2.79	107.56	160.15	16.82
	高坝洲(清江)	12.12	22.81	9.75	1.11	1.80	0.70	0.32	0.41	0.18	29.97	50.00	17.17
	白河(汉江)	32.27	74.49	10.24	3.46	6.93	0.56	0.91	1.64	0.29	33.22	48.90	9.66
	皇庄(汉江)	55.12	112.56	55.26	5.05	9.52	2.57	2.60	4.39	1.35	58.66	90.37	33.33
	城陵矶(洞庭湖)	457.14	803.62	398.50	31.63	34.61	28.88	17.43	20.16	14.81	419.64	526.81	311.04
	湖口(鄱阳湖)	257.34	409.40	210.06	22.03	32.42	13.91	8.41	11.28	6.45	173.97	243.10	122.88
	新河庄(水阳江)	13.65	20.56	14.59	0.64	0.85	0.32	0.26	0.32	0.20	7.74	12.19	5.12
	西河镇(青戈江)	5.97	12.43	5.52	0.31	0.54	0.18	0.18	0.34	0.10	5.97	9.71	4.20
	汉河集闸下(滁河)	7.01	13.51	2.88	1.40	2.46	0.17	0.25	0.42	0.04	4.04	7.48	0.87

以 2020 年月度变化特征对比分析,结果如图 6 所示. 统计污染物中各断面高锰酸盐指数、TP 和 TN 通量在月度表现中具有明显的高值区,整体呈现先增大后减小的分布特征,丰水期时各水系通量较高,断面水量对通量表现水平影响较大. 从各污染物通量时空变化图中综合来看,上游岷沱江、嘉陵江及中游两湖地区污染物通量对入江贡献较大,如中游洞庭湖水系高锰酸盐指数通量在 7 月汛期达到 168.8×10^3 t,超越长江中游干流均值 152.9×10^3 t,且逼近长江干流上游汛期最大值 191.3×10^3 t,而嘉陵江次之为 77.95×10^3 t. 反之,上游地区的雅砻江及乌江、中游地区的汉江及清江以及下游的水阳江、青戈江和滁河则对入江通量贡献较小,基本在 20×10^3 t 以下,反映出不同区域水环境下通量差异性的存在,即通量的空间响应关系,该关系具体内容在后文详细论述. 其他污染物中 TP 和 TN 与高锰酸盐指数这一变化特征相似,均是在 7、8 月达到峰值,TP 通量上游、中游和下游分别为 9.6×10^3、14.3×10^3 和 13.3×10^3 t,TN 为 186.0×10^3、182.1×10^3 和 405.3×10^3 t,除两湖外其他支流水系氮磷入江贡献较小,最大为下游青戈江入江,TN 和 TP 分别为 5.5×10^3 t 和 0.24×10^3 t,年内其他月份较为稳定. 在所选取污染物中,NH_4^+-N通量在长江干流上游和中游的枯水季中表现较为活跃,而在 13 个支流水系中其浮动较小. 由于污染物通量不只是流量的函数,亦是浓度的函数,通量变化特征也受污染物在水中浓度变化时(如吸附、降解等其他人为或自然作用过程)的影响,该现象可能与近年来实行严格的水环境管控政策,进行有效的环境污染改善措施有关[20].

2.3　污染物通量时空响应关系

2.3.1　通量与水量、水质相关性分析

污染物进入水体后,会受到吸附、稀释、降解和扩散等多种环境行为的影响,通过污染物通量与水量、水质的相关关系来辨析水体环境污染减排控制等作用效果,进而可以分析各类污染物影响因素,提高环保政策源头控制的精准性和有效性[37]. 将年尺度上主要污染物通量与水量数据经标准化处理,基于 IBM SPSS 24 进行回归分析,以 $P < 0.05$ 计显著性相关,结果如图 7 所示. 主要污染物中高锰酸盐

指数和 TP 通量与水量呈极显著性相关($P<0.01$),说明高锰酸盐指数和 TP 污染受地表径流雨雪冲刷裹挟等自然作用影响较大,主要来自于面源污染. TN 通量与水量表现为显著性相关($P<0.05$),NH_4^+-N通量与水量相关性较小($P>0.05$),易受集中工业废水排放等点源污染影响. 拟合度 R^2 介于 0.846 4 ~ 0.982 7之间.

化学需氧量和高锰酸盐指数可以综合反映水体中有机污染程度[38],生化需氧量有时会和氮、磷联用进行富营养化评估和预测藻华暴发. 选取主要污染物指标进行长江流域通量和水质数据的 Spearman 相关性分析显示,两者之间总体相关性一般,BOD_5 与 TN、TP 和 COD 有显著相关性($P<0.05$),相关性系数绝对值分别为 0.51、0.49 和 0.51. 这一现象可能反映出长江流域无机与有机物污染耦合作用在加强,在未来的环保工作中需要多加注意以及进一步研究. 根据富国[39]在通量计算公式类别划分时对河流过流污染源类型的讨论,在通量与水量和水质相关分析外,具体需要断定流域内污染源类型时,还需要根据浓度与水量相关性判断监测断面上游污染物面源、点源及混合排放类型,其中在面源污染占优区合理增加监测频率(尤其是对丰水期河流)对通过径流量数据推演通量估计的准确性有很大提升.

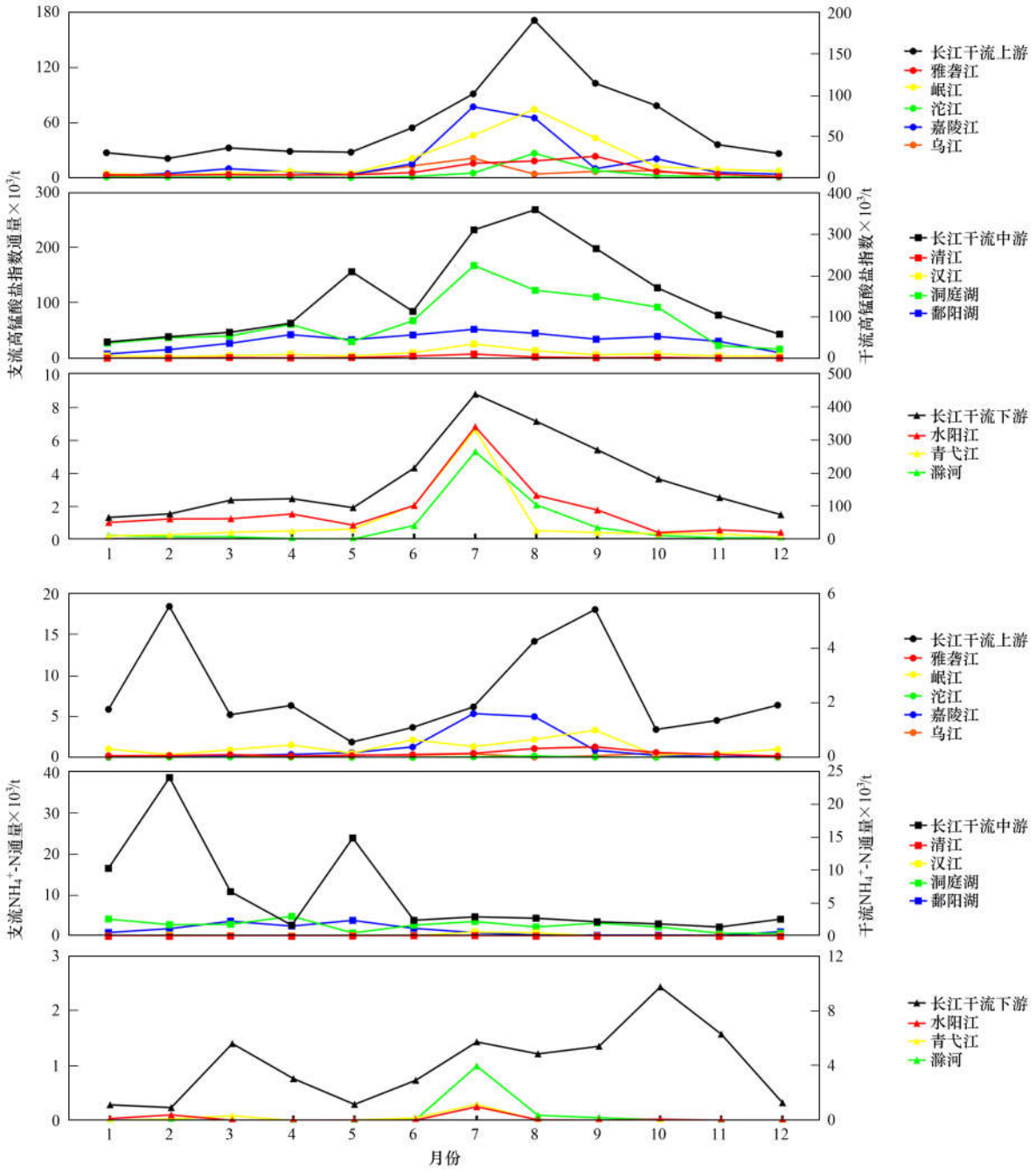
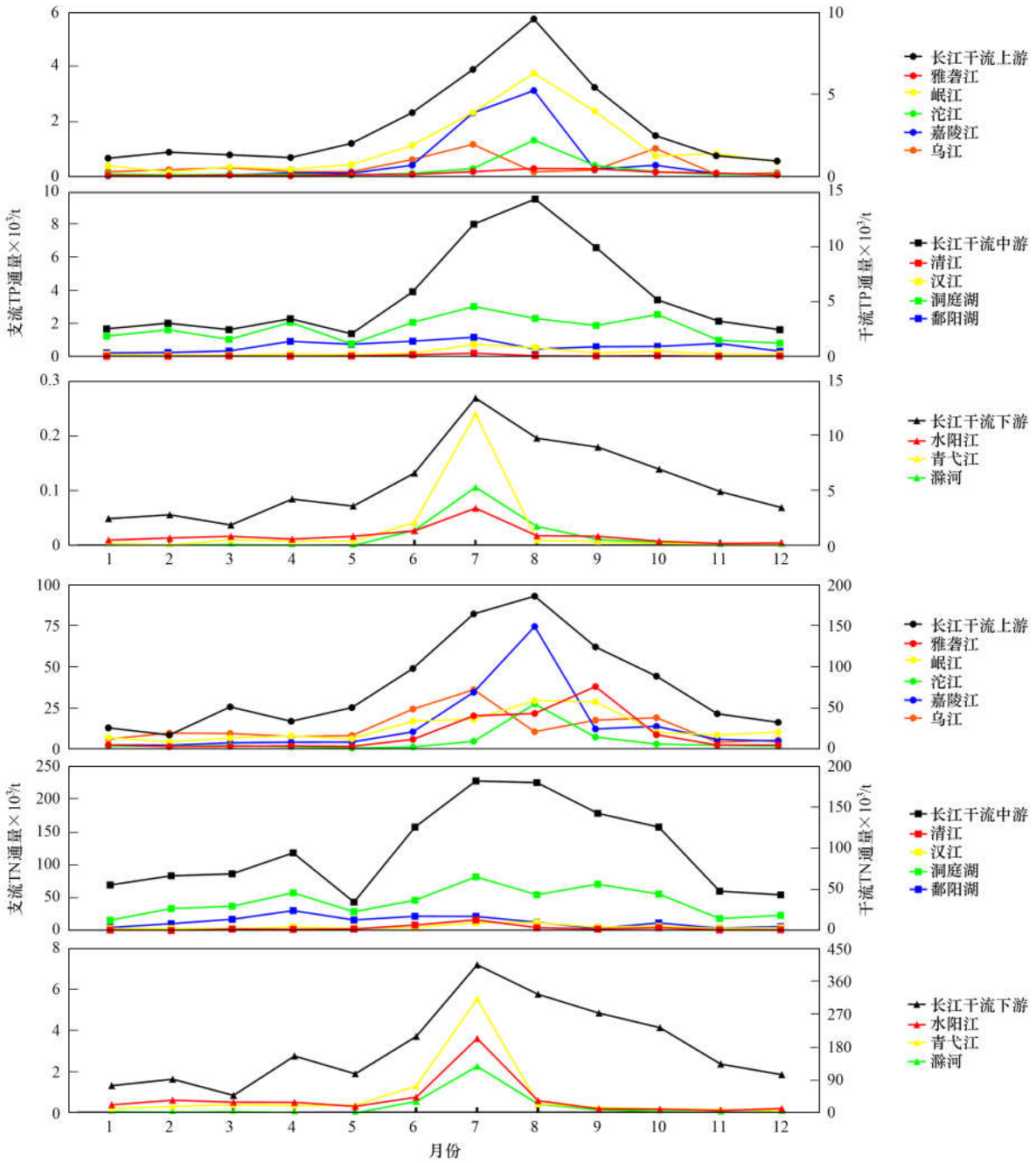


图 6 2020 年长江流域干支流高锰酸盐指数、NH_4^+-N、TP 和 TN 通量时空变化特征

Fig. 6 Spatiotemporal variations in permanganate index, NH_4^+-N, TP, and TN fluxes in the Yangtze River Basin in 2020

续图6

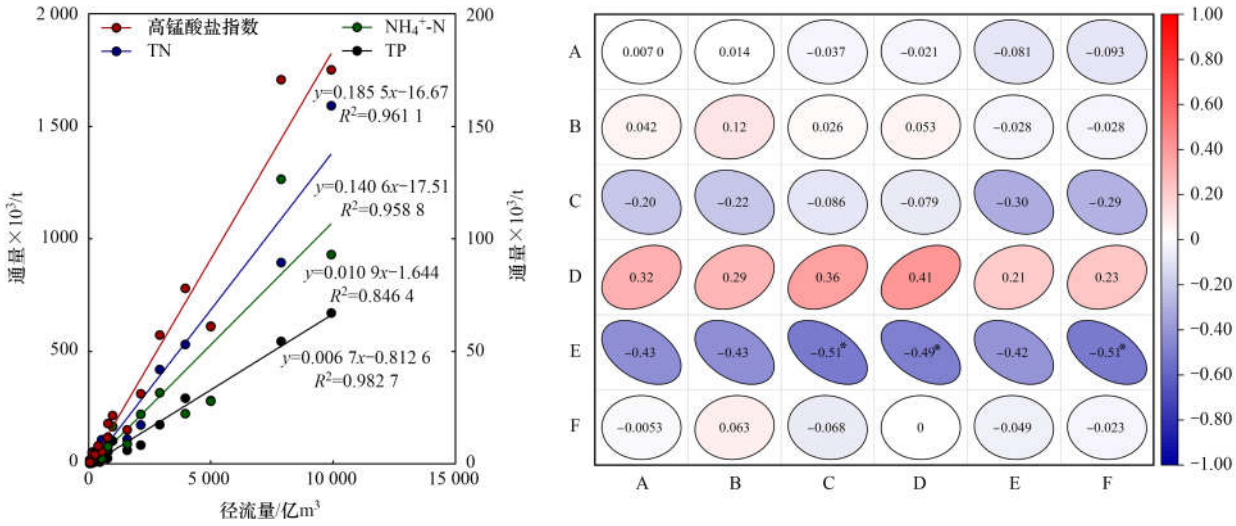


2.3.2　通量时空自相关响应关系

空间自相关是空间聚集程度的有效反映，是多元统计中广泛应用的一种聚类方法，目的在于揭示自然分组聚类情况[40,41]. 其中也不乏将时间指标纳入研究中，进行参数指标的时间聚类[32]. 因此本节进行通量时空自相关进一步辨别长江流域通量在时间和空间尺度上的层次单元属性，以期为长江流域点源和面源精准化管控提供理论支撑.

图 8 为以 TN 为例分别进行空间和时间尺度上的聚类结果. 通量相似性特征断面可分为两类，长江下游支流水系滁河及水阳江为一类，而同属于下游的青戈江与该大类距离较远，类似的情况还有鄱阳湖及洞庭湖，说明在当前情况下同一局部空间范围内(水量近似)的不同水系依然表现出不同的水质状况，目前长江流域尤其是下游入江三角洲地带水质环境治理政策仍然需要一地一议、因地制宜，不能一概而论. 长江中游和上游水系同属第二大类，大类断面具体以三峡大坝相隔可进一步划分为以汉口为代表的子类和以石鼓为代表的源头区、以岷沱江支流水系为代表的中上游区子类. 结合 2.1 节中水质空间分布特征情况，再次印证了三峡大坝对污染物的较强拦截分流作用.

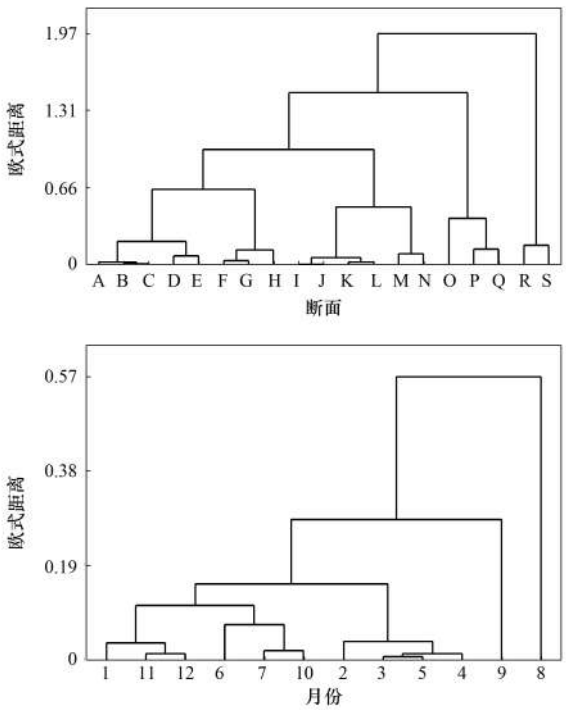
以 2020 年为特征年，选取主要污染物 TN 月度通量数据进行时间尺度上的层次聚类分析，根据图 8 可知，TN 通量在时间分布上季节差异性较为明显，汛期 8 月和 9 月 TN 通量和其他非汛期月度数



椭圆中数字表示 Spearman 相关性系数 r，* 表示显著相关，即 $P<0.05$，色柱对应其数值分布范围，椭圆右向倾斜表示正相关性，其离心率越大相关性越强，反之同理；A. 高锰酸盐指数，B. NH_4^+-N，C. TN，D. TP，E. BOD_5，F. COD

图 7 长江流域污染物通量与水量和水质相关性

Fig. 7 Correlation between pollutant fluxes, runoff, and concentration in the Yangtze River Basin



A. 石鼓，B. 北碚（嘉陵江），C. 武隆（乌江），D. 宜昌，E. 城陵矶（洞庭湖），F. 大通，G. 西河镇（青戈江），H. 高坝洲（清江），I. 向家坝，J. 高场（岷江），K. 寸滩，L. 富顺（沱江），M. 桐子林（雅砻江），N. 皇庄（汉江），O. 汉口，P. 白河（汉江），Q. 湖口（鄱阳湖），R. 新河庄（水阳江），S. 汉河集闸下（滁河）

图 8 长江流域污染物通量时空聚类树状图

Fig. 8 Temporal and spatial clustering trees of pollutant fluxes in the Yangtze River Basin

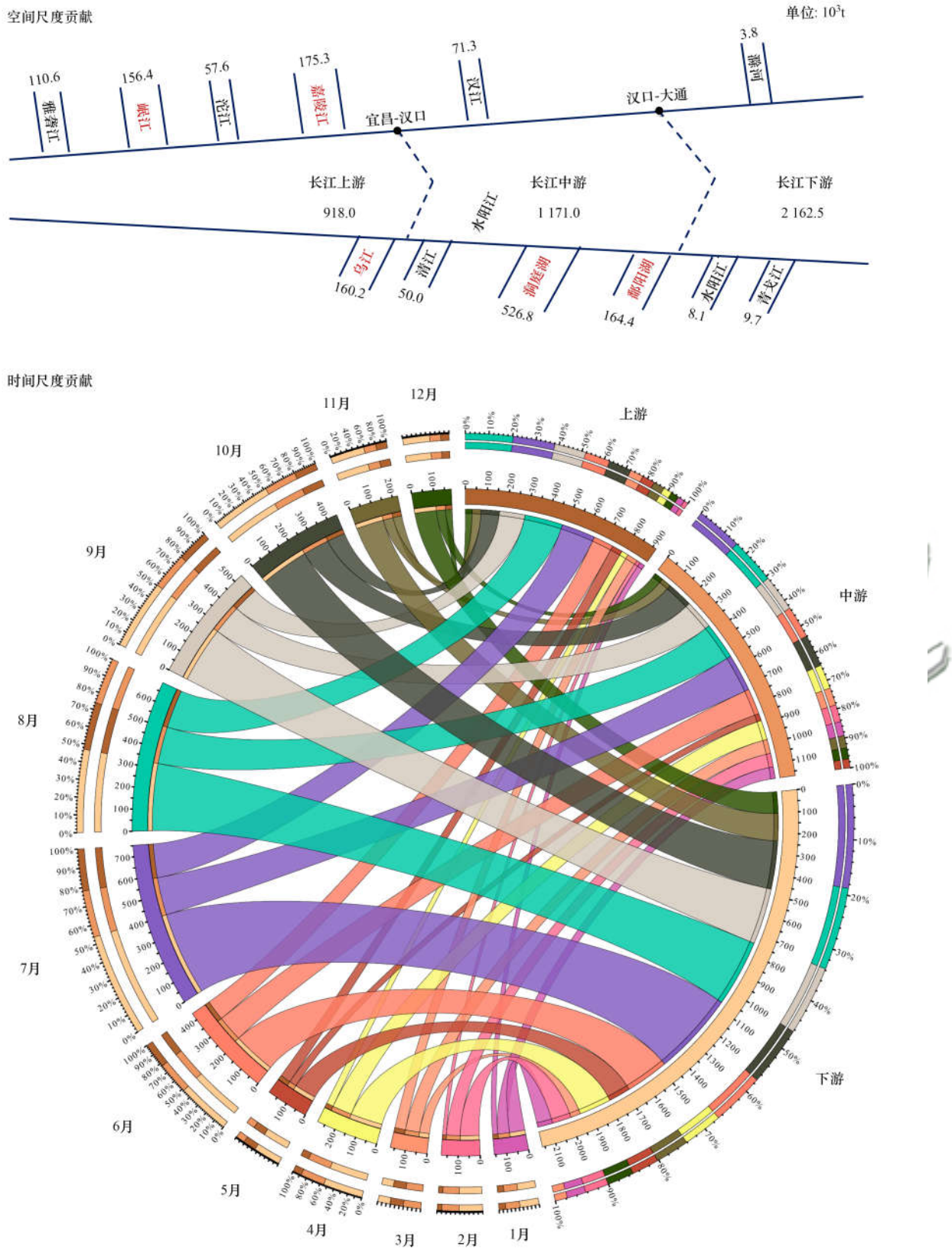
据有显著距离，再次印证 2.3.1 节中通量与水量相关性较强. 除此之外，2～5 月与 11 月至次年 1 月通量分属不同子类差距明显，对应长江水系在水量较平稳的平水期和枯水期特征也不尽相同. 因此，实行水环境治理具体措施时，除根据局部水体水质特征考虑外，亦应结合汛期与非汛期等水量相差较大情况制定不同规划.

2.3.3 通量时空贡献分析

通量时空贡献分析意在说明在时间和空间尺度下长江主要污染物的通量成分贡献. 以 2.2.2 节分析中表现最为强烈的 TN 通量数据为例对通量时空贡献进行具象化表述，图 9 为空间尺度下不同支流 TN 通量汇入干流上中下游表现以及时间尺度下对长江干流不同区段 TN 通量数据进行贡献分析，TN 在不同空间点位表现波动较为剧烈，可能与大范围水体非自然迁移补给如南水北调工程导致河道天然水文情势变异、水体自净情况逆转等的影响有关[32]，具体情况还需要通过大量实验进一步考证分析. 2020 年 TN 汛期和非汛期表现差距明显，7～9 月通量表现依然最强，非汛期中 1～3 月和 11～12 月亦有差距，如前者在上游和中游通量贡献较强，而 11～12 月主要为下游地区，再次说明在实施局部空间水环境调控措施时，需要多加考虑季节水体特征影响.

3 结论

（1）长江流域干流 TN 和 TP 浓度均在空间分布上呈现自西向东逐渐增高趋势，NH_4^+-N 波动幅度较小，干流上中下游高锰酸盐指数年度值在 2017～2020 年期间分别下降 18.5%、16.0% 和 14.0%，以上游下降幅度最高. 上游支流沱江水系污染物浓度高于其他地区，入江贡献最高. 2017～2020 年长江流域各主要污染物浓度整体呈下降趋势，TP 和



空间尺度下长江流域不同支流 TN 通量汇入干流上中下游通量表现以数值展示，红色标注通量贡献较大的支流；时间尺度下的贡献弦图外侧圆环表示贡献率(0～100%)，左半边月份对应右半边上中下游通量，内侧圆环表示具体数值，左半边即月度数值，右半边即空间尺度中的上中下游数值

图 9　长江流域 2020 年 TN 通量时空贡献

Fig. 9　Spatiotemporal contribution diagram of TN flux in the Yangtze River Basin in 2020

NH_4^+-N浓度下降较为明显.

(2)2017～2020 年长江流域自西向东干流径流量单调增大，4a 均值从 466 亿 m^3 显著增大到9 923 亿 m^3. 支流河湖水系中两湖流域水量贡献最大，年

均值分别为2 904.3亿 m^3 和2 133.8亿 m^3. 长江支流水系岷沱江、嘉陵江和中游两湖地区污染物通量对入江贡献较大,不同区域水环境下通量存在差异性,主要污染物中高锰酸盐指数、TP 和 TN 通量年均呈现先增后减的趋势,主要污染物指标在宜昌前后区间相差最大,三峡大坝截留作用明显.

(3)通过相关性分析,主要污染物指标中高锰酸盐指数和 TP 通量与水量呈极显著性相关,通量间 BOD_5 与 TN、TP 和 COD 有显著相关性. 通量时空层次聚类分析显示主要污染物在汛期和非汛期差异性较强,空间层次划分为不同子类,说明局部空间范围内的不同水系目前依然表现出差异性较大的水质状况. 通量贡献分析表明,长江流域主要污染物在7~9月汛期活动强烈,水质污染来源于自然源较多,易受水体迁移运动等自然影响形成天然污染带.

参考文献:

[1] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016-2019 年长江流域水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1100-1108.
Chen S R, He L H, Zhang F Y, *et al*. Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016-2019[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1100-1108.

[2] Chen K L, Guo Y Q, Liu X Q, *et al*. Spatial-temporal pattern evolution of wastewater discharge in Yangtze River Economic Zone from 2002 to 2015[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, **110**: 125-132.

[3] Huang Q H, Shen H T, Wang Z J, *et al*. Influences of natural and anthropogenic processes on the nitrogen and phosphorus fluxes of the Yangtze Estuary, China[J]. Regional Environmental Change, 2016, **6**(3): 125-131.

[4] Hou Y X, Zhang K R, Zhu Y C, *et al*. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of environmental governance performance in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149699.

[5] Huang R Y, Shen Z H, Wang H T, *et al*. Evaluating the energy efficiency of wastewater treatment plants in the Yangtze River Delta: perspectives on regional discrepancies[J]. Applied Energy, 2021, **297**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117087.

[6] Dong L, Lin L, Tang X Q, *et al*. Distribution characteristics and spatial differences of phosphorus in the main stream of the urban river stretches of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/w12030910.

[7] 王艳分, 倪兆奎, 林日彭, 等. 洞庭湖水环境演变特征及关键影响因素识别[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2554-2559.
Wang Y F, Ni Z K, Lin R P, *et al*. Evolution characteristics of the Dongting Lake water environment and revealing its key influent factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(7): 2554-2559.

[8] Li Z, Ma J R, Guo J S, *et al*. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992-2016)[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, **19**(3): 317-327.

[9] 王文静, 周才金, 聂真真, 等. 汉江襄阳河段主要污染物通量分析[J]. 水利水电快报, 2021, **42**(3): 68-73.
Wang W J, Zhou C J, Nie Z Z, *et al*. Flux analysis of main pollutants in Xiangyang section of Hanjiang river[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, **42**(3): 68-73.

[10] 刘发根, 王仕刚, 郭玉银, 等. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008-2012 年)[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 641-650.
Liu F G, Wang S G, Guo Y Y, *et al*. Spatial-temporal variations of pollutant fluxes of inflow and outflow of Lake Poyang (2008-2012)[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(5): 641-650.

[11] Chen L B, Tian Z, Zou K P. Water quality evaluation based on the water quality index method in Honghu Lake: one of the largest shallow lakes in the Yangtze River Economic Zone[J]. Water Supply, 2020, **20**(6): 2145-2155.

[12] 曾一川, 曾会国, 袁伟皓, 等. 长江口入海通道水质综合分析与模型预测[J]. 环境工程, 2022, **40**(5): 95-102, 108.
Zeng Y C, Zeng H G, Yuan W H, *et al*. Comprehensive analysis and model prediction of water quality in the Sea-entry Channels of Yangtze Estuary[J]. Environmental Engineering, 2022, **40**(5): 95-102, 108.

[13] Ding X W, Zhang J J, Jiang G H, *et al*. Early warning and forecasting system of water quality safety for drinking water source areas in Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Water, 2017, **9**(7), doi: 10.3390/w9070465.

[14] Di Z Z, Chang M, Guo P K, *et al*. Using real-time data and unsupervised machine learning techniques to study large-scale spatio-temporal characteristics of wastewater discharges and their influence on surface water quality in the Yangtze River Basin[J]. Water, 2019, **11**(6), doi: 10.3390/w11061268.

[15] 董春燕, 周运涛, 李君轶, 等. 基于模糊综合评价的长江中游水质分析[J]. 淡水渔业, 2021, **51**(2): 55-62.
Dong C Y, Zhou Y T, Li J Y, *et al*. Water quality analysis of the Middle Yangtze River based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Freshwater Fisheries, 2021, **51**(2): 55-62.

[16] Tao Y Q, Deng Y M, Du Y, *et al*. Sources and enrichment of phosphorus in groundwater of the Central Yangtze River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139837.

[17] Bai H, Chen Y, Wang Y G, *et al*. Contribution rates analysis for sources apportionment to special river sections in Yangtze River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2021, **600**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126519.

[18] Zhang P, Ruan H M, Dai P D, *et al*. Spatiotemporal river flux and composition of nutrients affecting adjacent coastal water quality in Hainan Island, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125293.

[19] Chen Y C, Lung W S, Yang H C, *et al*. Pollutant flux estimation in an estuary comparison between model and field measurements[J]. Environments, 2014, **1**(1): 107-123.

[20] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1150-1162.
Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, *et al*. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze Mainstem during recently 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1150-1162.

[21] 傅伯杰, 杨平. 海河水环境质量及污染物入海通量[J]. 环境科学, 2001, **22**(4): 46-50.
Fu B J, Yang P. Quality of aquatic environment at Haihe River and the pollutant fluxes flowing into sea[J]. Environmental Science, 2001, **22**(4): 46-50.

[22] 富国，雷坤. 河流污染物通量估算方法分析(Ⅱ)——时空平均离散通量误差判断[J]. 环境科学研究，2003，**16**(1)：5-9，42.
Fu G，Lei K. Analysis of the estimation methods for the river pollutant Fluxes (Ⅱ)：error judgment of time-averaged or section-averaged dispersion fluxes [J]. Research of Environmental Sciences，2003，**16**(1)：5-9，42.

[23] Zhang H，Cui K P，Guo Z，*et al*. Spatiotemporal variations of spectral characteristics of dissolved organic matter in river flowing into a key drinking water source in China[J]. Science of the Total Environment，2020，**700**，doi：10.1016/j.scitotenv.2019.134360.

[24] Weiss C M. Relation of phosphates to eutrophication[J]. Journal AWWA，1969，**61**(8)：387-391.

[25] Jarvie H P，Smith D R，Norton L R，*et al*. Phosphorus and nitrogen limitation and impairment of headwater streams relative to rivers in Great Britain：a national perspective on eutrophication[J]. Science of the Total Environment，2018，**621**：849-862.

[26] 朱光伟，许海，朱梦圆，等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学，2019，**31**(6)：1510-1524.
Zhu G W，Xu H，Zhu M Y，*et al*. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences，2019，**31**(6)：1510-1524.

[27] 秦延文，马迎群，王丽婧，等. 长江流域总磷污染：分布特征·来源解析·控制对策[J]. 环境科学研究，2018，**31**(1)：9-14.
Qin Y W，Ma Y Q，Wang L J，*et al*. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin：distribution characteristics，source and control strategy[J]. Research of Environmental Sciences，2018，**31**(1)：9-14.

[28] 周琴，贾海燕，卢路，等. 洞庭湖水质及出入湖主要污染物通量变化趋势分析[J]. 三峡生态环境监测，2021，**6**(2)：71-80.
Zhou Q，Jia H Y，Lu L，*et al*. Changing trend of the pollutant influx and outflux in Dongting lake and the water quality[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges，2021，**6**(2)：71-80.

[29] 张馨月，马沛明，高千红，等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. 湖泊科学，2019，**31**(3)：633-645.
Zhang X Y，Ma P M，Gao Q H，*et al*. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam[J]. Journal of Lake Sciences，2019，**31**(3)：633-645.

[30] 王超，辛小康，王树磊，等. 长距离人工输水渠道水质时空演变规律研究——以南水北调中线总干渠为例[J]. 环境科学学报，2022，**42**(2)：184-194.
Wang C，Xin X K，Wang S L，*et al*. Study on spatiotemporal change of water quality in long distance artificial water conveyance channels：A case study of the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2022，**42**(2)：184-194.

[31] 张怡雅，袁飞，张利敏，等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展，2022，**42**(3)：14-19.
Zhang Y Y，Yuan F，Zhang L M，*et al*. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2022，**42**(3)：14-19.

[32] 景朝霞，夏军，张翔，等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究，2019，**32**(1)：104-115.
Jing Z X，Xia J，Zhang X，*et al*. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River[J]. Research of Environmental Sciences，2019，**32**(1)：104-115.

[33] Lin J J，Chen N W，Wang F F，*et al*. Urbanization increased river nitrogen export to western Taiwan Strait despite increased retention by nitrification and denitrification [J]. Ecological Indicators，2020，**109**，doi：10.1016/j.ecolind.2019.105756.

[34] Fan J，Wang J Y，Hu X F，*et al*. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and phosphorus fractions under urban forest remnants of different vegetation communities in Southern China [J]. Urban Forestry & Urban Greening，2014，**13**(3)：576-585.

[35] Wan S Z，Chen F S，Hu X F，*et al*. Urbanization aggravates imbalances in the active C，N and P pools of terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Conservation，2020，**21**，doi：10.1016/j.gecco.2019.e00831.

[36] Chen F S，Fahey T J，Yu M Y，*et al*. Key nitrogen cycling processes in pine plantations along a short urban-rural gradient in Nanchang，China[J]. Forest Ecology and Management，2010，**259**(3)：477-486.

[37] 朱昕阳，蒋彩萍，马晓雁，等. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量[J]. 湖泊科学，2020，**32**(3)：629-640.
Zhu X Y，Jiang C P，Ma X Y，*et al*. Water quantity，quality and pollutant flux of inbound and outbound water in Zhejiang area of Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences，2020，**32**(3)：629-640.

[38] 吕文，杨惠，杨金艳，等. 环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系[J]. 湖泊科学，2020，**32**(5)：1454-1462.
Lv W，Yang H，Yang J Y，*et al*. Relationship between water quality in Lake Taihu and pollutant fluxes of the rivers surrounding Lake Taihu in Jiangsu province[J]. Journal of Lake Sciences，2020，**32**(5)：1454-1462.

[39] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I)-时段通量估算方法比较分析[J]. 环境科学研究，2003，**16**(1)：1-4.
Fu G. Analysis of the estimation methods for the river pollutant fluxes(I)：comparison and analysis of the estimation methods of period fluxes[J]. Research of Environmental Sciences，2003，**16**(1)：1-4.

[40] Hu X J，Ma C M，Huang P，*et al*. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection-a case of Weifang City，China [J]. Ecological Indicators，2021，**125**，doi：10.1016/j.ecolind.2021.107464.

[41] 李雪迎，杨曦，乔琦，等. 黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征[J]. 环境科学，2022，**43**(5)：2459-2466.
Li X Y，Yang X，Qiao Q，*et al*. Emission characteristics of industrial water pollutants in Gansu section of the Yellow River basin[J]. Environmental Science，2022，**43**(5)：2459-2466.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 8

Aug. 15, 2023

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of $PM_{2.5}$-O_3 Pollution in Tianjin from 2013 to 2020 ····· XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, *et al.* (4211)

Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020 ····· SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, *et al.* (4220)

Analysis of O_3 Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing ····· ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, *et al.* (4231)

Characteristics and Driving Factors of O_3 Pollution During 13th Five-Year Period in Tianjin ····· LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, *et al.* (4241)

Response of $PM_{2.5}$ and O_3 to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm ····· SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, *et al.* (4250)

Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China ····· WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, *et al.* (4262)

Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment ····· ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, *et al.* (4271)

Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020 ····· GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, *et al.* (4279)

Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River ····· KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, *et al.* (4292)

Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing ····· XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, *et al.* (4304)

Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City ····· HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, *et al.* (4314)

Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin ····· BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, *et al.* (4325)

Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems ····· DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, *et al.* (4334)

Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments ····· CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)

Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ··· ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, *et al.* (4353)

Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants ····· LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, *et al.* (4364)

Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters ····· HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, *et al.* (4374)

Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan ····· WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, *et al.* (4387)

Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District ····· GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, *et al.* (4397)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model ····· DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, *et al.* (4406)

Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area ····· YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, *et al.* (4416)

Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China ····· WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, *et al.* (4429)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure ····· DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, *et al.* (4440)

Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area ····· JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, *et al.* (4448)

Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth ····· MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, *et al.* (4458)

Application of Fe_3O_4/Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content ····· RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, *et al.* (4468)

Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil ····· ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, *et al.* (4479)

Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in Cadmium Contaminated Soil ····· LI Ping, NIE Hao, LANG Man, *et al.* (4489)

Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils ····· HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, *et al.* (4497)

Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ··· RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, *et al.* (4507)

Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil ····· LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, *et al.* (4519)

Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil ····· YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, *et al.* (4530)

Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland ····· LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, *et al.* (4541)

Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars ····· ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, *et al.* (4554)

Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil ····· XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, *et al.* (4565)

Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River ····· LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, *et al.* (4575)

Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation ····· LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, *et al.* (4585)

Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism ····· YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, *et al.* (4599)

Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China ····· LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, *et al.* (4611)

Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak ····· MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, *et al.* (4623)

Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost ····· ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, *et al.* (4637)

Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures ····· LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, *et al.* (4647)

Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China ····· CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, *et al.* (4655)

Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi ····· GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, *et al.* (4666)

Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China ····· LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, *et al.* (4679)

Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration ····· WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, *et al.* (4689)

Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland ····· QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, *et al.* (4698)

Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level ····· SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, *et al.* (4706)

Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants ····· HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, *et al.* (4717)

Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment ····· ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, *et al.* (4728)

Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions ····· ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, *et al.* (4742)

Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review ····· WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, *et al.* (4751)

Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology ····· AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, *et al.* (4764)